

# 不同纤维改性石灰土的力学特性研究

钱健,周琳,杨建冬,张伟清,姜屏\*

(绍兴文理学院 土木工程学院,浙江 绍兴 312000)

**摘要:**通过无侧限抗压强度试验,研究聚丙烯纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维、碳纤维对石灰土力学性能的影响,旨在得出对石灰土改性效果最好的纤维(石灰掺量为6%,纤维掺量分别为0、0.5%、0.75%、1%)。研究发现:①4种纤维均能提高石灰土的模强比,且聚丙烯纤维能大幅降低石灰土的脆性指数,提高石灰土的韧性指数,其他3种纤维效果相反;②除了聚丙烯纤维,其他3种纤维对石灰土各项性能的提升并不大。主要是因为聚丙烯纤维在土体中的分散性较好,而其他3种纤维分散性较差,容易成团,大大影响了纤维与土体颗粒之间的界面摩擦力和空间约束效应。

**关键词:**纤维;石灰土;模强比;脆性指数;韧性指数

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

随着中国经济的快速发展,高速公路等交通基础设施也在不断发展。而路基是整个道路结构的重要组成部分,路基的强度和稳定性直接影响道路的使用安全。但一般的路基土由于强度和稳定性不够无法直接用作路基填料,因此需要对路基土进行改性处理。

目前对路基填料的处治主要使用石灰<sup>[1-4]</sup>、粉煤灰<sup>[5]</sup>、水泥<sup>[6]</sup>等固化剂对其进行化学改良,大量研究表明:在土体中加入石灰能大大提高土体的抗压强度和抗剪强度。虽然石灰土的抗压性能很好,但抗拉性能差,脆性高,容易开裂。而道路裂缝的产生跟抗拉强度有关,因此工程中通常掺加纤维来提高土体的抗拉强度和改善其脆性。

纤维主要是通过纤维与土壤颗粒之间的界面摩擦力和空间约束效应来提高土体的力学性能和耐久性,研究人员对此已经进行了大量研究。徐洪钟等<sup>[7]</sup>通过室内试验研究了玄武岩纤维膨胀土的强度特性,结果表明:掺入纤维能提高土的无侧限抗压强度和抗剪强度;Estabragh等<sup>[8]</sup>通过无侧限抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验研究了聚丙烯纤维对水泥土力学性能的影响,研究发现:在水泥掺量一定的情况下,纤维掺量和长度的增加能提高水泥土抗压强度和抗拉强度;阮波等<sup>[9]</sup>通过无侧限抗压强度试验研究了玻璃纤维对红黏土强度的影响,发现玻璃纤维能显著提高红黏土的抗压强度,且强度随纤维长度增加而增加,随纤维掺量

增加强度先增加后减小;Boz等<sup>[10]</sup>通过对比试验研究了聚丙烯纤维和玄武岩纤维对石灰土强度的影响,发现不加石灰的情况下两种纤维均能提高土体的强度,而加了石灰的情况下聚丙烯纤维对石灰土强度提升显著高于玄武岩纤维。以上研究表明:纤维能显著提高土体的强度,但对于土体脆性与韧性的研究还不是很完善。

除了强度之外,还有弹性模量、脆性指数、韧性指数<sup>[11]</sup>也是路基材料的重要力学参数。该文选用常用的4种纤维:聚丙烯纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维和碳纤维,通过无侧限抗压强度试验研究4种纤维对石灰土力学性能和各力学指标的影响,旨在得出对石灰土改性效果最好的纤维。

## 1 无侧限抗压强度试验

### 1.1 试验材料

试验所用路基土来自浙江绍兴某工地,所用石灰为生石灰,所用纤维分别为聚丙烯纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维、碳纤维,纤维主要物理参数如表1所示。

### 1.2 试验方案

通过无侧限抗压强度试验研究7d龄期下4种不同纤维石灰土的力学特性。石灰掺量固定为6%;纤维掺量分别为0、0.5%、0.75%、1%;含水率取最优含水率

收稿日期:2020-09-24

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(编号:Q20E080042)

作者简介:钱健,男,硕士研究生。E-mail:qianjiansx@163.com

\*通信作者:姜屏,男,博士,副教授。E-mail:jiangping@usx.edu.cn

17.5%；养护方式为 7 d 标准养护，试验方案见表 2。

表 1 4 种纤维的物理力学参数

纤维类型	直径/ μm	长度/ mm	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	极限抗 拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa
聚丙烯纤维	18~48	6	0.91	>500	>3.85
玻璃纤维	10~20	6	2.54	>1 370	>7.31
玄武岩纤维	7~14	6	2.64	>3 000	>91
碳纤维	7	6	1.80	>5 013	>238

表 2 试验方案

试样编号	各种材料掺量/%				
	石灰	PF	GF	BF	CF
LS-0		0	0	0	0
PLS-1		0.5	0	0	0
PLS-2		0.75	0	0	0
PLS-3		1	0	0	0
GLS-1		0	0.5	0	0
GLS-2		0	0.75	0	0
GLS-3	6	0	1	0	0
BLS-1		0	0	0.5	0
BLS-2		0	0	0.75	0
BLS-3		0	0	1	0
CLS-1		0	0	0	0.5
CLS-2		0	0	0	0.75
CLS-3		0	0	0	1

注：PF—聚丙烯纤维；GF—玻璃纤维；BF—玄武岩纤维；CF—碳纤维；LS—石灰土；PLS—聚丙烯石灰土；GLS—玻璃纤维石灰土；BLS—玄武岩纤维石灰土；CLS—碳纤维石灰土。下同。

1.3 试验过程

根据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》<sup>[12]</sup>，试样为 φ50 mm×50 mm 的圆柱形，每组掺量做 6 个试样。纤维石灰土无侧限抗压强度试验步骤如下：

(1) 土样制备。将原状土烘干后捣碎，过 2 mm 的筛，得到路基土样。根据试验方案把称好的石灰与路基土充分搅拌，再加水搅拌，然后加入纤维搅拌均匀，得到混合料，最后将混合料装入保鲜袋中浸润 24 h。

(2) 试样制备。先将混合料分两次装入涂抹好机油的试模中。随后将整个试模放入压力试验机上，以 1 mm/min 的加载速率加压，直到上下垫块都压入试

模为止，维持压力 2 min，压实度控制为 95%。接着把试模放到脱模器上将试样顶出，最后将试样放入标准养护室中，养护温度为 (20±2) °C，相对湿度为 95%，养护龄期为 7 d，养生期最后一天将试样取出，浸水养护 1 d。

(3) 试样测试。对浸水养护后的试样进行无侧限抗压强度试验，试验仪器为全自动多功能无侧限抗压机，加载速率为 1 mm/min。

2 试验结果分析

试验前期发现，经过 1 d 浸水养护后，1% 纤维掺量的 GLS、BLS 与 CLS 试样发生破坏，无法获得数据。

从应力—应变曲线特征、抗拉性能、延性和韧性几方面比较 4 种纤维对石灰土的提升效果，旨在得出哪种纤维效果最好。

2.1 应力—应变曲线

通过无侧限抗压强度试验，得到各配比纤维石灰土的应力—应变曲线，如图 1 所示。

从图 1 可以看出：石灰土和纤维石灰土的应力—应变曲线都是软化型曲线，应力随应变先增大后减小。其中 PLS 的峰值应力和峰值应变随纤维掺量增加逐渐增大；GLS 与 BLS 的峰值应力都随纤维掺量增加先减小后增大，峰值应变都随纤维掺量增加逐渐增大；CLS 的峰值应力随纤维掺量增加逐渐减小，峰值应变随纤维掺量增加逐渐增大。

综上所述，聚丙烯纤维对石灰土抗压强度的提升效果最好，不仅能够提升强度，还能增加石灰土的延性。且最佳掺量为 1%。

根据应力—应变曲线，可得到各配比纤维石灰土的峰值强度  $q_u$ 、残余强度  $q_c$  和弹性模量  $E$ ，其中残余强度取峰值应变增加 5% 应变时对应的强度，结果如表 3 所示。

2.2 模强比

通常用弹性模量来描述材料抵抗变形的能力。从表 3 可以看出：石灰土的弹性模量与强度有关，强度越大，弹性模量越大。并且加入聚丙烯纤维后石灰土的弹性模量增大，而加入其他纤维时则减小。

为了更好地描述纤维石灰土抵抗变形的能力，该文引入模强比  $\lambda$ <sup>[13]</sup> 的概念。模强比是弹性模量  $E$  与强度  $q_u$  的比值，用式(1)来计算：

$$\lambda = \frac{E}{q_u}$$

(1)

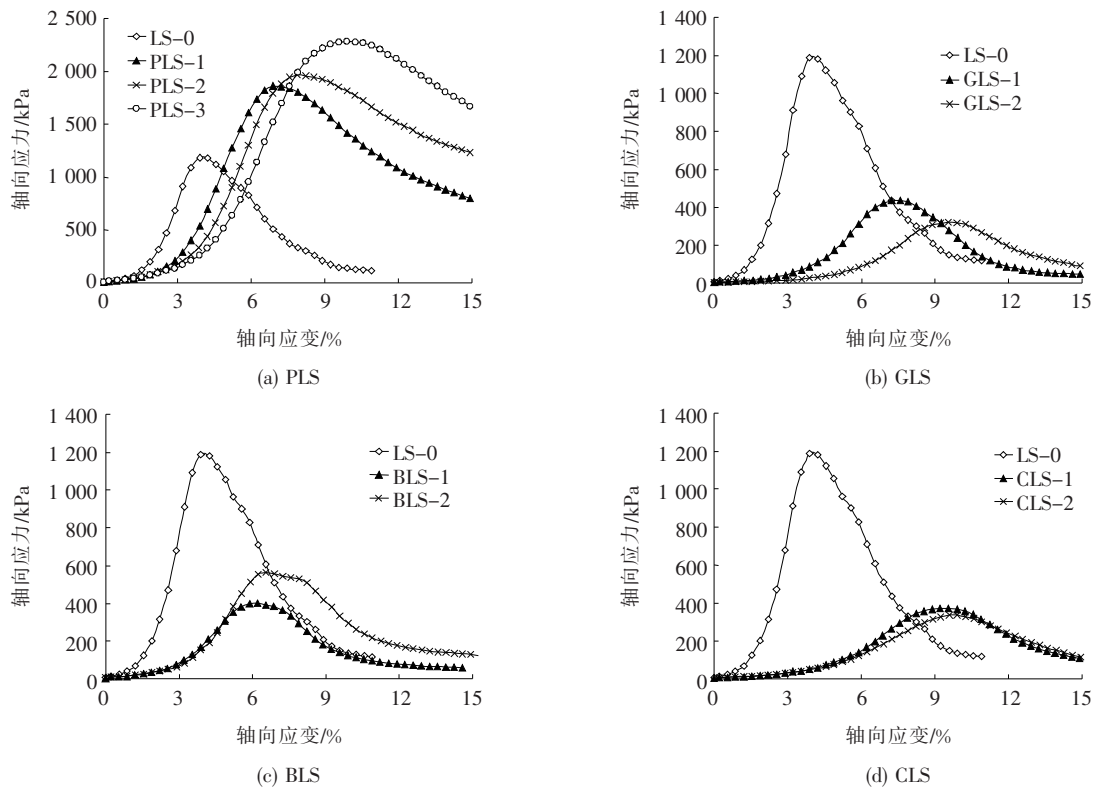


图1 不同纤维石灰土的应力—应变曲线

表3 各配比纤维石灰土的 $q_u$ 、 $q_c$ 、 $E$

试样编号	峰值强度 $q_u$ /kPa	残余强度 $q_c$ /kPa	弹性模量 $E$ /MPa
LS-0	1 188	208	47.3
PLS-1	1 860	1 093	50.8
PLS-2	1 966	1 404	53.8
PLS-3	2 280	1 671	54.2
GLS-1	438	70	12.0
GLS-2	321	98	6.7
GLS-3	—	—	—
BLS-1	401	89	13.7
BLS-2	566	188	19.6
BLS-3	—	—	—
CLS-1	371	115	9.0
CLS-2	336	116	6.7
CLS-3	—	—	—

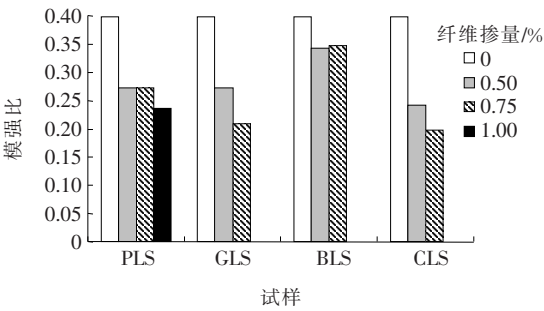


图2 不同纤维石灰土的模强比

相比于弹性模量,模强比不仅能够描述材料抵抗变形的能力,而且能够描述材料的抗拉性能,模强比越小,说明材料抵抗变形的能力越强,抗拉性能越好。

根据表3和式(1)计算各配比纤维石灰土的模强比,结果如图2所示。

从表3和图2可以看出:掺入纤维都会使石灰土的模强比减小。PLS的弹性模量随纤维掺量增加逐渐增大,模强比逐渐减小。GLS的弹性模量和模强比都随纤维掺量增加逐渐减小。BLS的弹性模量和模强比都随纤维掺量增加先减小后增大,在纤维掺量为0.5%时达到最小。CLS的弹性模量和模强比都随纤维掺量增加逐渐减小。因此,掺入纤维能够提高石灰土的模强比,但除了聚丙烯纤维,其他3种纤维都会降低石灰土的弹性模量。综合来说,聚丙烯纤维对石灰土抵抗变形能力和抗拉性能的提升效果是最好的。

### 2.3 脆性指数

通常用脆性指数 $I_B$ <sup>[14]</sup>来描述材料的延性,脆性指数越小,说明材料的延性越好,用式(2)来计算:

$$I_B = \frac{q_u - q_c}{q_u} \quad (2)$$

根据表 3 和式(2)计算各配比纤维石灰土的脆性指数,结果如图 3 所示。

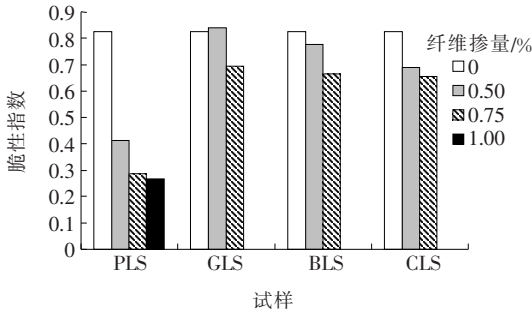


图 3 不同纤维石灰土的脆性指数

从图 3 可以看出:PLS、BLS 和 CLS 的脆性指数都随纤维掺量增加逐渐减小。GLS 的脆性指数随纤维掺量增加先增加后减小,在纤维掺量为 0.5% 时达到最大。综上所述,加入聚丙烯纤维后,石灰土的脆性指数下降幅度最大,而其他 3 种纤维加入之后的脆性指数下降幅度不大。因此对石灰土的脆性改善效果最好的纤维是聚丙烯纤维,且纤维掺量为 1%。

2.4 韧性指数

韧性指数  $T_I$ <sup>[11]</sup> 指材料完全失效时的应力—应变能,用来描述材料的韧性, $T_I$  值越大说明材料的韧性越好,破坏时吸收的应力—应变能越大,也能间接说明材料的强度高,用式(3)来计算:

$$T_I = \frac{A_c - A_u}{\epsilon_c - \epsilon_u} \quad (3)$$

式中: $A_c - A_u$  为图 4 中的面积; $\epsilon_c$  为残余应变; $\epsilon_u$  为峰值应变。

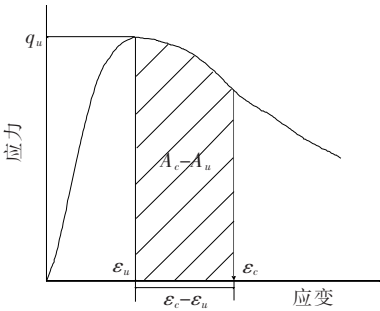


图 4 韧性指数计算图示

根据式(3)计算各组试样的韧性指数  $T_I$ ,见图 5。  
从图 5 可以看出:PLS 的韧性指数随纤维掺量增加逐渐增大。GLS 和 CLS 的韧性指数随纤维掺量增大逐渐减小。BLS 的韧性指数随纤维掺量增加先减小后增大,在纤维掺量为 0.5% 时达到最小。综上所述

述,加入聚丙烯纤维后,石灰土的韧性指数提升幅度最大,而其他 3 种纤维加入之后的韧性指数均有所下降。该变化规律与表 3 中强度的变化规律相同,说明韧性指数能从另一个角度描述材料的强度。因此对石灰土的韧性改善效果最好的纤维是聚丙烯纤维,且纤维掺量为 1%。

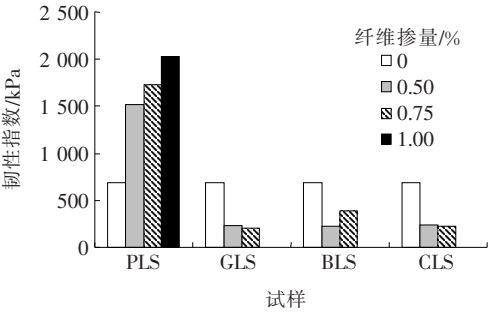


图 5 不同纤维石灰土的韧性指数

3 纤维作用机理分析

3.1 一般纤维作用机理

纤维土是加筋土的一种,纤维对土体的加强机理主要分为弯曲机理和交织机理<sup>[15]</sup>。

弯曲机理是指纤维在土体中呈弯曲分布,当土体受到外力作用时,纤维弯曲的凹侧与土颗粒之间产生界面摩擦力和压力,从而起到加固土体的作用。

交织机理是指纤维在土体中无序分布时会产生交织点,这些交织点组合在一起会形成一张受力网。当受到外力作用时,交织点会产生位移,但交织点连接着纤维,纤维会阻碍交织点的位移,从而联动受力网,起到抵抗外力的作用。

综上所述,纤维对土体加强作用是由弯曲机理和交织机理共同作用的。当纤维掺量较少时,纤维之间没有产生交织点,这时主要是弯曲机理起作用。当纤维掺量增加时,纤维之间产生交织点,这时由纤维和土体之间的界面摩擦力和纤维相互交织形成的受力网同时起作用。但纤维掺量过量时<sup>[15]</sup>,纤维会大量附着在一起形成团块,影响了纤维与土体之间的摩擦作用和纤维受力网的形成,从而降低了土体的强度。

3.2 试验结果原因分析

通过 4 种纤维石灰土力学性质的对比,发现除了聚丙烯纤维,其他 3 种纤维的效果并不好,甚至具有不好效果。主要是纤维在土体中的分散性不同造成的。

纤维分散性的好坏,一方面是源自纤维材料本身的性质不同;另一方面是试验过程中的搅拌方式。

纤维材料本身性质中,细度对分散性有较大的影响,细度越小越容易成团,参考表1,聚丙烯纤维的细度要比其他3种纤维大得多。除了细度,纤维表面的物理性质影响也较大<sup>[16]</sup>,表面较为光滑的纤维分散性较好,并且表面经过抗静电处理的纤维分散性也较好。而聚丙烯纤维相较于其他3种纤维表面更光滑,且经过了抗静电处理。

搅拌方式有多种,如将材料全部一起搅拌、先搅拌干料最后放水等。此次试验先将石灰和土搅拌均匀,再加入水搅拌,最后加入纤维。由于纤维吸水性质的不同,导致吸水性高的纤维越容易和已经湿润的土结合,越容易成团(图6)。

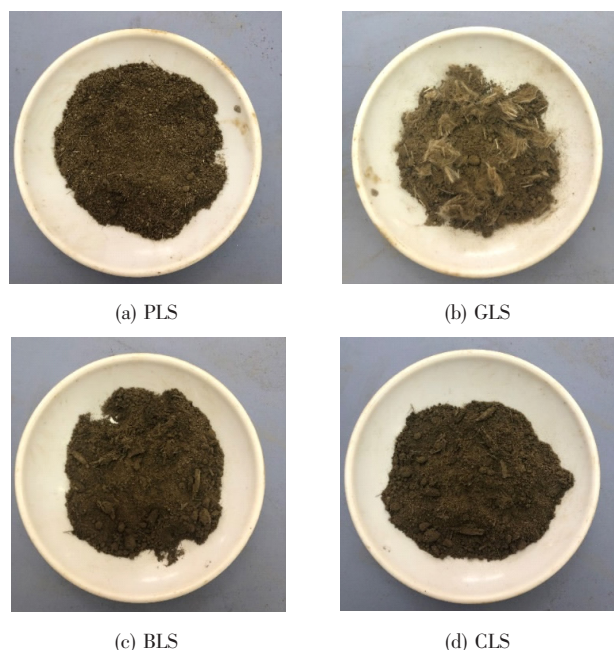


图6 不同纤维石灰土的土样

从图6可以看出:聚丙烯纤维在土体中分散较好且均匀分散,而其他3种纤维分散较差,形成了团块。

聚丙烯纤维分散性好,能与土体颗粒产生较高的界面摩擦力,且形成的纤维受力网也较完整,限制了土体的变形和位移。而其他3种纤维的分散性较差,纤维受力网的形成不完整,大大影响了土体荷载的传递和裂缝的扩张,而且纤维容易成团,形成了弱受力区。

综上所述,其他3种纤维石灰土,由于各自纤维分散性较差,导致石灰土抵抗变形能力降低,韧性降低,强度降低,脆性提高。

## 4 结论

通过无侧限抗压强度试验对 PLS、GLS、BLS、

CLS 的力学特性进行了对比和分析,得到以下结论:

(1) 掺入4种纤维均能提高石灰土的模强比,但除了聚丙烯纤维,其他3种纤维会降低石灰土的弹性模量。因此聚丙烯纤维对石灰土抵抗变形能力和抗拉性能的提升效果最好。

(2) 加入聚丙烯纤维后,石灰土的脆性指数下降幅度最大,而其他3种纤维加入后的脆性指数下降幅度不大。因此对石灰土的脆性改善效果最好的纤维是聚丙烯纤维。

(3) 加入聚丙烯纤维后,石灰土的韧性指数提升幅度最大,而其他3种纤维加入后的韧性指数均有所下降。因此对石灰土的韧性改善效果最好的纤维是聚丙烯纤维。

(4) 除了聚丙烯纤维,其他3种纤维对石灰土各项性能的提升并不大,甚至还有副作用。主要是因为聚丙烯纤维在土体中的分散性较好,而其他3种纤维分散性较差,容易成团,大大影响了纤维与土体颗粒之间的界面摩擦力和空间约束效应。

## 参考文献:

- [1] BALDOVINO J D J A, MOREIRA E B, IZZO R L D S, et al. Empirical Relationships with Unconfined Compressive Strength and Split Tensile Strength for the Long Term of a Lime-Treated Silty Soil[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(8): 06018008.
- [2] LIU Y, WANG Q, LIU S, et al. Experimental Investigation of the Geotechnical Properties and Microstructure of Lime-Stabilized Saline Soils under Freeze-Thaw Cycling[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 161: 32—42.
- [3] 王天亮,王扬,刘建坤.冻融作用下石灰土填料的力学特性研究[J].铁道学报,2014,36(2):109—115.
- [4] 宋学庆.石灰粉煤灰黄土工程性质试验研究[J].中外公路,2017,37(5):228—232.
- [5] 宋亮.粉煤灰掺量对水泥稳定路面回收料强度和干缩性能的影响[J].中外公路,2017,37(4):266—269.
- [6] CARO S, AGUDELO J P, CAICEDO B, et al. Advanced Characterisation of Cement-Stabilised Lateritic Soils to be Used as Road Materials[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20(12): 1425—1434.
- [7] 徐洪钟,彭铁群,赵志鹏,等.短切玄武岩纤维加筋膨胀土的试验研究[J].建筑科学,2012,28(9):44—47.
- [8] ESTABRAGH A R, RANJBARI S, JAVADI A A. Properties of Clay Soil and Soil Cement Reinforced with Polypropylene Fibers[J]. Materials, 2017, 114(2): 195—205.